Journal of Convergence for Information Technology
Vol. 12. No. 4, pp. 9-13, 2022
e-ISSN 2586-4440
DOI : https://doi.org/10.22156/CS4SMB.2022.12.04.009

지형 바운스를 이용하는 크로스 아이 재밍의 모노펄스 레이다 거리 오차

임중수, 채규수*
백석대학교 첨단IT학부 교수

Distance error of monopulse radar in cross-eye jamming using terrain bounce

Joong-Soo Lim, Gyoo-Soo Chae*
Professor, Division of Advanced IT, Baekseok University

요 약 본 논문에서는 지면반사를 이용한 크로스아이 재밍에 의해서 발생되는 모노펄스 레이다의 추적오차를 분석한다. 크로스아이 재밍은 위상과 진폭이 다른 두 신호를 동시에 레이다로 송신하여 레이다 추적 시스템에 오차를 발생시키는 방법이다. 모노펄스 레이다가 지형 바운스에 의해서 발생되는 크로스 아이 재밍신호를 수신하면 고각 방향으로 추적오차가 발생 한다. 다중반사가 존재하는 저고도 환경에서 추적 레이다 수신기에서는 재머에서 송신된 신호가 직접 경로와 반사 경로 두 신호가 도달하여 그 경로 차에 의해 오차가 발생한다. 지형 바운스 재밍은 단일 재머를 이용하여 할 수 있는 장점이 있으나 재밍에 영향을 미치는 공간은 지형 반사각과 지형의 산란 정도에 의해서 제한된다. 본 연구는 해상에서 저고도로 날아오는 미사일이나 항공기로부터 함정을 보호하기 위해서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 지형 바운스, 모노펄스 레이다, 추적 오차, 크로스아이, 재밍

Abstract In this paper, the tracking error of monopulse radar caused by cross-eye jamming using terrain bounce is analyzed. Cross-eye jamming is a method of generating an error in a radar tracking system by simultaneously transmitting two signals with different phases and amplitudes. When the monopulse radar receives the cross-eye jamming signal generated by the terrain bounce, a tracking error occurs in the elevation direction. In the presence of multipath, this signal is a combination of the direct target return and a return seemingly emanating from the target image beneath the terrain surface. Terrain bounce jamming has the advantage of using a single jammer, but the space affecting the jamming is limited by the terrain reflection angle and the degree of scattering of the terrain. This study can be usefully used to protect ships from low-altitude missiles or aircraft in the sea.

Key Words : Terrain bounce, Monopulse radar, Tracking error, Cross-eye, Jamming

1. 서론

감시 정찰이나 추적시스템에 많이 사용되는 모노펄스 레이다는 재래식 재밍 기술에 대해서 매우 강력한 전자보호 능력을 가지고 있어서 전자전의 전자공격(electronic attack: EA) 분야 재밍(jamming) 연구에 큰 도전이 되고 있다. 지금까지 많이 연구된 모노펄스 추적 레이다에 대한 주요 재밍 방식은 크로스폴(cross polarization), 크로스아이(cross-eye), 블링킹(blinking), 지형 바운스(terrain bonce) 재밍 등이 있다[1-4].

그러나 단일 플랫폼에 재머를 탑재하여 안정적인 재밍을 할 수 있는 방법으로는 크로스아이 재밍과 크로스

*This work is supported by the Baekseok University research fund.
*Corresponding Author : Gyoo-Soo Chae(gschae@bu.ac.kr)
Received February 14, 2022 Revised March 5, 2022
Accepted April 20, 2022 Published April 28, 2022

폴 재밍이 제일 많이 연구되고 있다[5,6]. 특히 크로스 아이 재밍은 항공기나 함정의 기동에 강인한 재귀형 크로스 아이 재밍이 많이 연구되고 있으나 재귀형 크로스 아이 재밍은 2세트의 수신기와 재머가 동기 되어 사용되어야 하므로 구조가 매우 크고 복잡하다[7-9].

본 논문에서는 1세트의 수신기와 재머로 지표면이나 해면 등 지형 바운스(반사와 산란)를 이용하여 수직 방향으로 크로스 아이 재밍을 구현하여 모노펄스 레이다의 추적을 오도시키는 수직 크로스 아이 재밍의 원리와 효과를 분석한다.

본 논문은 2장에서 모노펄스 레이다의 추적 원리, 3장에서 크로스 아이 재밍 원리, 4장에서 지형 바운스를 사용하는 수직 크로스 아이 재밍, 5장에서 지형 바운스 크로스 아이 재밍 효과를 기술한다.

2. 모노펄스 레이다 추적 원리

모노펄스 레이다는 한 개의 펄스 신호로 표적의 탐지 및 추적이 가능하므로 전자전 입장에서는 재밍이 매우 어려워서 중요한 위협으로 분류한다. 모노펄스 레이다는 Fig. 1과 같이 2개 또는 그이상의 수신 안테나 피드에 수신된 전력의 합과 차를 이용하여 표적의 위치와 추적 방향을 계산한다. 특히 표적을 정확하게 추적하기 위해서 안테나의 추적 각도를 지속적으로 조정하여 표적을 연속적으로 추적 한다[10].

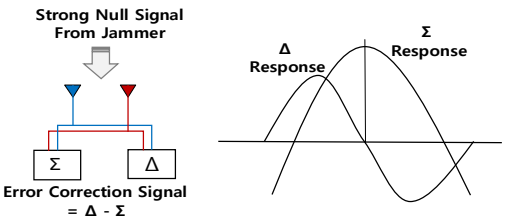

Fig. 1. Tracking response of a monopulse radar [11-12]

3. 크로스 아이 재밍 원리

Fig. 2는 모노펄스 레이다와 이것을 재밍하는 크로스 아이 재머의 일반적인 조우 상황이다. 모노펄스 레이다는 펄스변조 신호를 사용하여 목표물을 추적하며 크로스 아이 재머는 레이다 신호를 수신한 후에 신호의 위상 및 진폭을 변형하여 재밍 신호를 만들어 송신한다. 이 때 재밍 신호는 L 만큼 떨어진 2개의 재머에서 크기가 같고 위상이 180도 다른 2 개의 재밍신호가 송신되어 모노펄스 레이다 수신기에 방위각(azimuth angle)또는 고각(elevation angle) 방향으로 추적 오차를 발생시킨다.

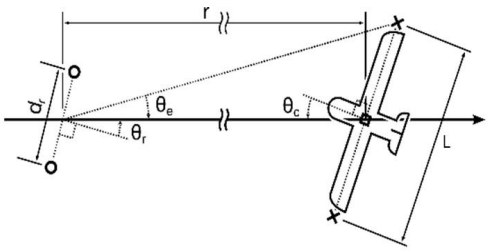

Fig. 2. Operational drawing of monopulse radar and Cross-eye jammer[13]

모노펄스 레이다 수신기는 재밍신호가 표적 반사 신호보다 20dB 이상 큰 경우 수신기에 도착한 두 개의 재밍 신호만을 신호처리 하여 추적 각도를 계산한다. 크로스 아이 재밍에 의한 모노펄스 레이다의 추적 각도 및 추적 각도 오차, 추적 거리 오차는 참고문헌 [2-3]에서 잘 설명되어 있어서 본 논문에서는 그 결과를 이용한다.

Fig. 2와 같이 두 개 재머의 거리를 L, r 거리에서 레이다로 추적할 수 있는 각도 범위를 θ, 재머 기준선(재머를 직선으로 연결하는 가상의 선)의 직각방향(법선 방향)과 레이다가 재머를 추적하는 방향이 이루는 조우각도를 ψ라 하면 $\psi = \theta_c + \theta_r$ 이 된다. 따라서 레이다의 추적 각도 오차 θ_{err} 및 추적 오차 거리 R_m는 식 (1), (2)과 같이 유도된다.

$$\theta_{err} = \frac{\Delta\theta}{2} \frac{1-a^2}{1+2a\cos\phi+a^2} \tag{1}$$

$$R_m = \frac{L\cos\psi}{2} \frac{1-a^2}{1+2a\cos\phi+a^2} \tag{2}$$

여기서, a는 두 개 재밍 신호의 진폭 비이고 ϕ는 위상차이다.

4. 지형 바운스를 사용하는 수직 크로스 아이 재밍

지형 바운스 재밍은 Fig. 3과 같이 저공으로 비행하는 미사일이나 항공기를 대상으로 지상 또는 탑재체에 설치된 재머를 이용하여 실시한다. 적의 미사일이 모노펄스 레이다를 설치하고 아군의 재머를 추적해 올 때, 탑재체에 설치된 아군 재머에서 적의 미사일이 다가오

는 지면(또는 해면)을 향하여 재밍 신호를 송신하면, 재밍신호가 지면(또는 해면)에서 반사되어서 적의 미사일에 수신되어 미사일의 재머 추적방향을 방해한다. 지형 바운스 재밍은 위의 경우와 반대인 경우에도 사용할 수 있다. 즉, 재머를 탑재한 아군항공기가 적의 지상 레이다를 재밍 할 수도 있다.

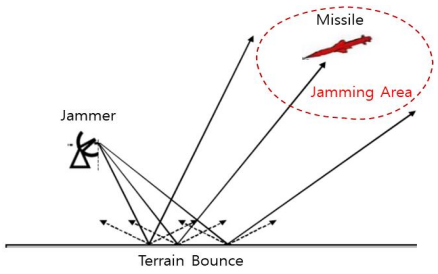

Fig. 3. Geometry of a terrain bounce jamming

Fig. 4는 재머에서 지형 바운스를 이용하여 미사일에 설치된 적의 모노펄스 레이다를 재밍하는 개념도이다. 여기서 H_t는 반사면으로부터 재머까지의 높이, H_m은 반사면으로부터 모노펄스 레이다가 설치된 미사일까지의 높이, ψ는 반사면에 대한 바운스 재밍 입사각, R은 재머로부터 모노펄스 레이다까지의 수평거리, R_1은 재머로부터 모노펄스 레이다까지의 직접경로 거리, R_2는 재머로부터 모노펄스 레이다까지의 다중경로 거리이다.

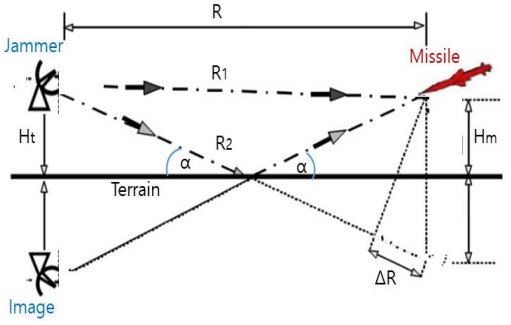

Fig. 4. Geometry of the ground bounce jamming

재머에서 미사일을 향해 직접 경로재밍과 지형 바운스 재밍을 실시하면 지형에서 반사된 재밍신호는 마치 크로스 아이 재머에서 오는 신호처럼 동작하기 때문에 두 개 재머의 거리가 $2H_t$인 크로스 아이 재머의 각도기만 효과를 나타낼 수 있다. 이 때 충분한 각도기만 효과를 얻기 위해서는 직접경로 재밍 신호와 지면에서 반사된 재밍신호가 거의 같은 시간에 모노펄스 레이다에 도착해야 한다. 또한 직접경로 신호의 수신각도와 지면반사 신호의 수신각도 차이가 모노펄스 레이다의 빔폭보다 작아야 한다.

R_1과 R_2의 거리 차이(ΔR)에 의해서 발생하는 위상오차 $\Delta\phi$ 는 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 또한 표적(missile or aircraft)이 재밍영역(jamming area)를 이동하므로 ΔR이 변하므로 $\Delta\phi$도 연속적으로 변한다고 볼 수 있다[3].

$$\Delta\phi = \frac{2\pi \cdot \Delta R}{\lambda} \tag{3}$$

지형 바운스 크로스 아이 재밍 시스템을 설계할 때는 직접경로와 반사경로의 거리차이로 인해 발생하는 두 신호의 위상차를 고려해야하므로 재밍신호를 발생하는 디지털 고주파 기억장치(digital radio frequency memory)와 같은 신호 복제 및 지연장치가 필요하다.

5. 지형 바운스 크로스 아이 재밍 효과

Fig. 5는 Fig. 2에서 조우각(tracking angle) ψ 가 0°인 경우에 a와 ϕ를 변경하면서 식 (2)을 이용하여 거리오차를 시뮬레이션한 결과이다. $a=1$이고 $\phi=180^\circ$ 일 때 최대 거리오차가 발생하는 것을 알 수 있다. R_m/L 은 크로스아이 재머의 안테나 거리(L)에 대한 추적거리오차(R_m)의 비(ratio)이다. 따라서 Fig. 4에서 H_t가 20m이면 L은 40m가 된다[13-15].

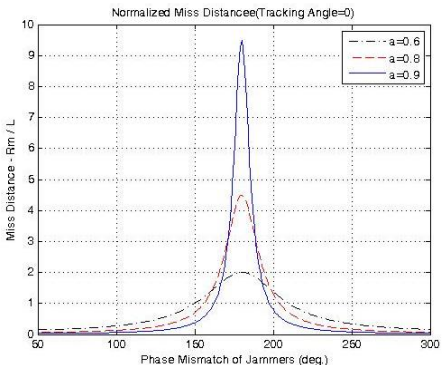

Fig. 5. Phase mismatch of jammer vs. Miss distance of radar tracking

Fig. 6, 7, 8은 $a=0.9$, $a=0.8$, $a=0.6$인 경우에 위상차 ϕ와 조우각 ψ를 변경하면서 거리오차를 3차원으로

시뮬레이션한 결과이다. 세 가지 경우 모두 $\phi = 180^\circ$와 $\psi = 0^\circ$일 때 최대 오차가 발생하였으며, $a = 0.9$인 경우가 $a = 0.6$인 경우보다 조우각 증가에 따른 오차거리가 훨씬 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

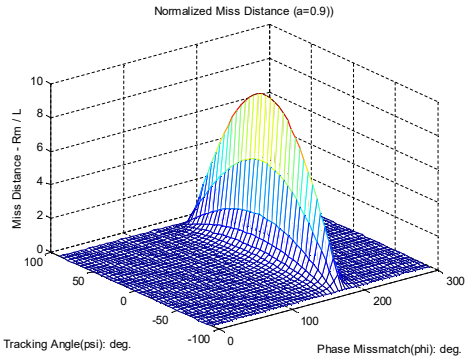

Fig. 6. Engagement angle and phase mismatch of jammer vs. Miss distance of monopulse radar (a=0.9)

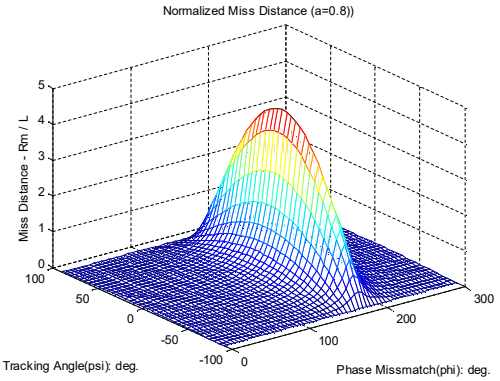

Fig. 7. Engagement angle and phase mismatch of jammer vs. Miss distance of monopulse radar (a=0.8)

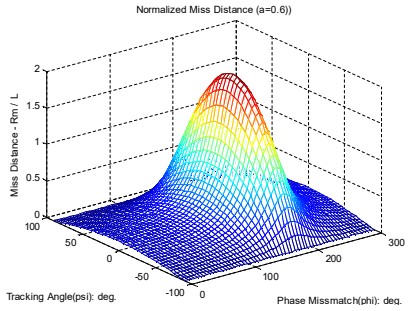

Fig. 8. Engagement angle and phase mismatch of jammer vs. Miss distance of monopulse radar (a=0.6)

Fig. 9는 $a = 0.6$인 경우에 위상차 ϕ를 -360° ~ 360°, 조우각 ψ를 -90° ~ 90°로 변경하면서 거리오차를 3차원으로 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 4에서 ΔR의 변화에 따라서 $\Delta\phi$가 주기적으로 바뀌므로 추적오차거리도 주기적으로 바뀌는 것을 볼 수 있다.

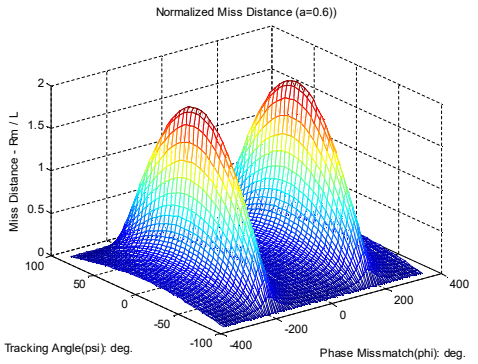

Fig. 9. Engagement angle of jammer vs. Miss distance of monopulse radar (a=0.6)

6. 결론

본 논문에서는 모노펄스 레이다에 지형 바운스 재밍을 사용하여 수직 방향으로 추적 거리 오차가 발생하는 크로스 아이 재밍에 대해서 기술하였다. 제안한 방법은 한 개의 재머로도 구현이 가능하여 기존에 많이 연구된 재귀형 크로스 아이 재머 보다 구현이 용이하며, 현재 운용되고 있는 단일 재머의 구조와 호환성이 있기 때문에 효과적으로 모노펄스 레이다 및 미사일 탐색기를 기만하기 위한 핵심기술로 활용할 수 있을 것이다.

본 연구는 해상에서 저고도로 비행하는 미사일 에 대한 재밍이 매우 효과적이며, 다양한 조우각에서 공격하는 미사일 탐색기를 방어하기 위하여 다수 채널 크로스아이 재머에 대한 연구가 지속적으로 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

[1] A. D. Mattino. (2012). *Introduction to Modern EW Systems,* Artech House, 325-334.

[2] D. Curtis Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age,* Artech House, Boston, 201-214.

[3] F. Neri, (2001). *Introduction to electronic*

Defense Systems, 2nd ed., Artech House, Boston, 324-336

[4] D. L. Adamy. (2015). *EW 104 EW against a New Generation of Threats,* Artech House, 319-321

[5] L. B. van Brunt. (1995). *Applied ECM,* volume 3, EW Engineering. Inc. VA, 4128-4133.

[6] W. D. Plessis. (2010). *A Comprehensive Investigation of Retrodirective Cross-Eye Jamming.* Ph.D. Thesis, University of Pretoria, Pretoria, South Africa, 86-95.

[7] Y. S. Jang & J. T. Park (2018). Performance Experiment of the Angle Deception of Cross-Eye Jamming against a Monopulse Sensor. *Journal of the Korean Institute of EM Engineering and Science, 29(2)*, 146-149.
DOI : 10.5515/KJKIEES.2018.29.2.146

[8] W. D. Plessis. (2016), Cross-Eye gain in multi-loop retrodirective cross-eye jamming. IEEE Trans. *Aerosp Electron Systm, 52(2),* 875-882.
DOI : 10.1109/TAES.2016.140112

[9] T. Liu, X. Wei, Z. Liu & Z. Guan. (2019). Continuous and Stable Cross-Eye Jamming via a Circular Retrodirective Array. *Journal of Electronics, 8(7)*, 1-16.
DOI : 10.3390/electronics8070806

[10] B. R. Mahafaza. (2005). *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*(2nd Edition), Chapman and Hall, 297-300,

[11] J. S. Lim, & G. S. Chae. (2021). Analysis of the monopulse radar tracking errors according to the JSR of cross-eye jammer and radar reflection signal. *Journal of Convergence for Information Technology, 11(8),* 23-28.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2021.11.08.023

[12] J. S. Lim, & G. S. Chae. (2020). Analysis of the Monopulse Radar Tracking Errors using Orthogonally Deployed Antenna Sets for Cross-eye Jamming, *Journal of Convergence for Information Technology, 10(6),* 14-18.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.06.014

[13] J. S. Lim, & G. S. Chae. (2020). Range Error of Monopulse Radar according to the Engagement Angle of Cross-Eye Jammer, *Journal of Convergence for Information Technology, 10(5),* 30-35.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.05.030

[14] Y. S. Jang & C. H. Lee. (2016). Cross Eye Technique with Single Transceiver, *Journal of the KMIST 19(5)*, 598-605.
DOI : 10.9766/KIMST.2016.19.5.598

[15] C. K. Singh & S. D. Sinha. (2013), Effect of Terrain Bounce Jamming on Missile guidance in a Sea Environment, *Journal of Battlefield Technology, 16(2),* 11-16.

임 중 수(Joong-Soo Lim) [정회원]

· 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과(공학석사)
· 1994년 3월 : Auburn University (공학박사)
· 1980년 8월 ~ 2003년 12월 : 국방과학연구소
· 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 첨단IT공학부 교수
· 관심분야 : 전자파 이론, 광대역 주파수 소자 설계, 레이다 및 전자전 장비 설계/분석
· E-Mail : jslim@bu.ac.kr

채 규 수(Gyoo-Soo Chae) [종신회원]

· 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기공학과(공학박사)
· 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager
· 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 첨단 IT공학부 교수
· 관심분야 : 안테나 설계, 초고주파 이론, IoT 시스템
· E-Mail : gschae@bu.ac.kr